

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311724

# 一种高灵敏度声表面波振动传感器的设计研究\*

张娟<sup>1,2</sup>, 张磊<sup>1</sup>, 程文华<sup>1</sup>, 马宏帅<sup>1</sup>, 谭秋林<sup>1</sup>

(1. 中北大学省部共建动态测试技术国家重点实验室 太原 030051; 2. 太原工业学院机械工程系 太原 030008)

**摘要:** 高温振动监测在故障诊断、设备维护等方面发挥重要作用,为此本文提出一种基于四端固定梁对称结构的硅酸镓镧(LGS)声表面波(SAW)高温振动传感器,采用算法优化设计,可实现高灵敏度、宽频段等特性,耐温最高可达800℃;构建四端固定梁SAW振动传感器数学模型,分析其灵敏度与固有频率;建立传感器结构模型,并在20℃~800℃内进行力学与电学仿真,揭示传感器高温力学与电学性能变化规律。结果表明,本传感器相比单一SAW谐振器结构,灵敏度提高约7.047倍;在20℃~800℃内,灵敏度随温度升高而增大,800℃时达到 $9.8791 \times 10^{-6}/g$ ;固有频率随温度升高而减小,800℃为3 018.4 Hz。最后通过实验初步验证了本设计方案的可行性,为SAW振动传感器优化设计与高温应用提供新的思路。

**关键词:** 振动传感器;声表面波;硅酸镓镧;高温振动监测

中图分类号: TH89 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

## Research on the design of a high-sensitivity surface acoustic wave vibration sensor

Zhang Juan<sup>1,2</sup>, Zhang Lei<sup>1</sup>, Cheng Wenhua<sup>1</sup>, Ma Hongshuai<sup>1</sup>, Tan Qiulin<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China)

**Abstract:** High-temperature vibration monitoring is essential for failure diagnosis and equipment maintenance. This paper presents a  $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$  (LGS) surface acoustic wave (SAW) high-temperature vibration sensor based on the symmetrical structure of four-end fixed beam, capable of withstanding temperatures up to 800℃ and providing high sensitivity and wide band by using an optimized algorithm. Then the mathematical model of SAW vibration sensor with a four-end fixed beam was constructed, and the sensitivity and natural frequency of the sensor were analyzed. Subsequently, the structural model of the sensor was established, and the mechanical and electrical simulations were carried out in the range of 20℃~800℃, which reveals the mechanical and electrical properties of the sensor at high temperature. The results show that the sensitivity of the proposed sensor in this study is about 7.047 times higher than that of the sensor with single SAW resonator, and the sensitivity increases progressively with temperature at 20℃~800℃, reaching  $9.8791 \times 10^{-6}/g$  at 800℃. The natural frequency decreases with temperature, showing 3 018.4 Hz at 800℃. Finally, the feasibility of the design was preliminarily verified by experiments, which provides a new idea for the optimization design and high-temperature application of SAW vibration sensor.

**Keywords:** vibration sensor; surface acoustic wave;  $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ ; high-temperature vibration monitoring

## 0 引言

高温振动监测广泛应用于航空航天、工业生产、核电等领域,能够及时发现异常信号,避免重大事故发生,减少经济损失<sup>[1-3]</sup>。而振动监测主要依靠高温振动传感器实

现,传感器的性能优劣直接决定了监测是否准确、及时、有效,从而对后续故障诊断、设备维护、寿命预测等产生重要影响,因此,高温振动传感器在振动监测中发挥着重大作用。与此同时,上述测试环境存在高温、高旋、辐射等恶劣因素,对传感器的生存性能进一步提出了更高要求<sup>[4]</sup>。

收稿日期:2023-07-26 Received Date: 2023-07-26

\* 基金项目:国家自然科学基金(U1837209,52105594)、山西省基础研究计划(20210302124274)、山西省高等学校科技创新计划(2023L361)项目资助

高温振动传感器按传感原理划分,主要包括压阻式、电容式、光纤式和压电式<sup>[5]</sup>。压阻式传感器通过电阻变化响应振动,不易受电磁干扰,但材料电阻率的温度依赖性限制了其超高温应用<sup>[6]</sup>。电容式传感器利用平行板或叉指结构受力引起电容变化来感知振动,测量精度较高,但其在高温下易受寄生电容影响,抗干扰性差<sup>[7]</sup>。光纤传感器由于不受电磁干扰且能耐高温工作因而也得到广泛应用。然而,其使用需要复杂的信号解调系统,且光纤脆弱易损坏,不便于在恶劣环境中长期应用<sup>[8]</sup>。压电传感器,由于其灵敏度高、响应频带宽、信噪比大等特点特别适合于高温应用<sup>[9-10]</sup>。常见的包括压电电荷型、压电电压型和声表面波型(surface acoustic wave, SAW)。其中,声表面波型是利用压电效应借助叉指换能器将力学参量转换成电学谐振频率变化的压电类传感器<sup>[11]</sup>。由于其准数字输出、可实现无线传输、易于批量化生产等优势,近来广泛受到研究者青睐。

声表面波高温力学传感机制本质上都是应变引起 SAW 电学谐振频率变化,目前研究主要集中在高温压力、应变、振动等方面。Moulzolf 等<sup>[12]</sup>设计了一种方形空腔结构的硅酸镓镧( $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ , LGS) SAW 高温压力传感器,实现了  $500^\circ\text{C}$ , 225 psia 的压力测量。Shu 等<sup>[13]</sup>将 LGS SAW 传感器利用高温陶瓷粘结剂粘贴在金属悬臂梁上进行无线高温应变测试,实现了  $500^\circ\text{C}$ ,  $300\ \mu\epsilon$  的高温应变测量。Maskay 等<sup>[14]</sup>在镍基合金悬臂梁上粘贴 LGS SAW 传感器进行高温振动测试,实现了  $500^\circ\text{C}$  的振动频率与幅值测量。Merkulov 等<sup>[15]</sup>将 SAW 传感器粘贴在旋转体上模拟旋转振动环境无线测试,以期实现多路 SAW 传感器集成系统在高温电力行业应用。上述研究大多利用高温粘结剂制备器件结构或将传感器粘贴在力学部件上,以实现高温力学测量。器件最高工作温度一方面受限于粘接剂的耐高温性能,另一方面,粘接剂与被粘贴件存在热应力不匹配等问题,也会造成器件失效。因此,其测试最高温度大多在  $500^\circ\text{C}$  左右。此外,SAW 振动传感器的工作频率也受限于所粘贴的部件结构。

声表面波振动传感器的另一种类型是利用压电材料本身结构形式构成器件载体,主要研究集中在通过材料与结构设计来改善器件性能等方面。Filipiak 等<sup>[16]</sup>采用 ST-X 切向石英设计了悬臂梁结构 SAW 延迟线型振动传感器,工作频率在 200 Hz 以下,用于室温电子报警系统。Wang 等<sup>[17]</sup>同样基于 ST-X 切向石英悬臂梁结构,研制了带温度补偿的 SAW 双端口谐振型加速度传感器,固有频率为 500 Hz,灵敏度为  $29.7\ \text{kHz/g}$ 。Bower 等<sup>[18]</sup>通过多种差分结构设计制备了高稳定性石英 SAW 谐振型加速度计,并指出通过调控晶片切向、结构优化、电路补偿等

方法可以进一步提高传感器性能。然而该类研究中 SAW 振动传感器大多基于单一悬臂梁结构,存在固有频率低、工作带宽窄等问题,且研究内容大多围绕传感器常温性能展开,缺乏 SAW 振动传感器高温传感机制及热力学耦合性能等研究,限制了其无线传输等优势性能在高温领域的发挥。因此,围绕 SAW 高温振动传感开展研究具有重要意义。

LGS 是一种新型高温压电单晶,能够保持在熔点  $1470^\circ\text{C}$  前不发生相变,具有良好的高温压电性能<sup>[19]</sup>。因此,针对上述问题,本文提出一种基于 LGS 的四端固支梁 SAW 高温振动传感器,通过优化结构与算法设计,采用 8 个相同 SAW 谐振器对称布局,最高能够实现  $800^\circ\text{C}$  的振动测量,且该器件具有高灵敏度、宽频段等特性。其次,构建了四端固支梁 SAW 振动传感器数学模型,为器件结构优化设计提供理论依据。进一步,在  $20^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$  内进行 SAW 振动传感器的高温力学与电学性能仿真,揭示其高温变化规律。最后,通过实验初步验证了本设计方案的可行性,为 SAW 高温振动传感研究提供参考,拓宽其高温领域应用。

## 1 传感器原理与模型

### 1.1 工作原理

SAW 振动传感器的工作原理如图 1 所示,其敏感元件为位于梁上的 SAW 谐振器,该谐振器具有基础电学谐振频率  $f_0$ 。当外界发生振动时,SAW 振动传感器的梁产生应变  $\epsilon$ ,导致声表面波传播路径上的相速度  $v$  与波长  $\lambda$  发生改变,从而引起 SAW 谐振器的电学谐振频率  $f$  变化<sup>[20]</sup>。因此,可以用该变化来表征外界振动。

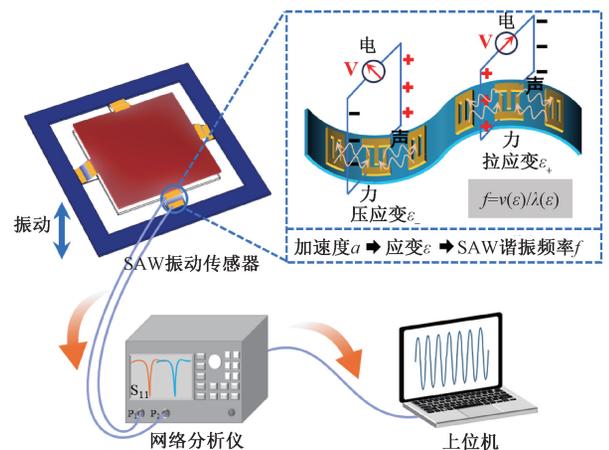


图 1 SAW 振动传感器工作原理示意图

Fig. 1 Schematic illustration of SAW vibration sensor

## 1.2 设计方案

为了实现高灵敏度、宽频段耐高温振动传感,本文采用 LGS 压电材料,设计了一种多谐振器对称布局的四端固支梁式 SAW 高温振动传感器。如图 2 所示,该传感器由 4 根梁和中心质量块组成,每根梁上布局 2 个 SAW 谐振器, X 轴向的谐振器依次记为  $x_i (i=1, 2, 3, 4)$ , Y 轴向的谐振器依次记为  $y_i (i=1, 2, 3, 4)$ ,所有 SAW 谐振器的结构参数相同。由于 LGS 晶片切向( $0^\circ, 138.5^\circ, 26.7^\circ$ )具有良好的温度特性<sup>[21]</sup>,因此选用该切向作为 X 轴向。

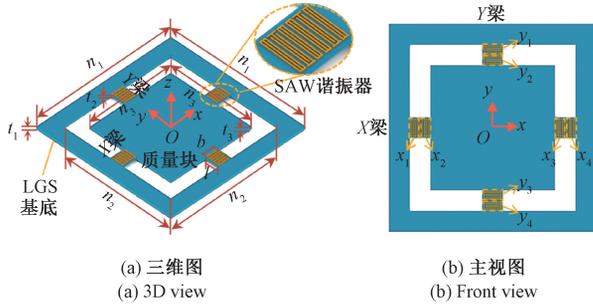


图 2 SAW 振动传感器结构设计

Fig. 2 Structure design of SAW vibration sensor

## 1.3 数学模型

振动传感器的主要性能指标包括传感器的灵敏度和固有频率。理想的振动传感器应具有较高灵敏度与较大固有频率,高灵敏度的传感器能够检测到微弱信号,而较大固有频率的传感器工作频段更宽,适用范围更广。然而传感器的灵敏度与固有频率之间存在强耦合关系,通过建立 SAW 振动传感器的数学模型,以便更好地实现传感器优化设计。

### 1) 传感器灵敏度

为了便于力学分析,根据本文提出的四端固支梁 LGS SAW 高温振动传感器的结构对称性,选取传感器结构中具有单个 SAW 谐振器的左端梁为研究对象,构建传感器的力学模型,如图 3 所示为左端梁力学模型示意图,其中左侧为固定端,右侧受集中载荷  $F = 1/4ma$ ,  $m$  为等效质量,  $a$  为加速度。

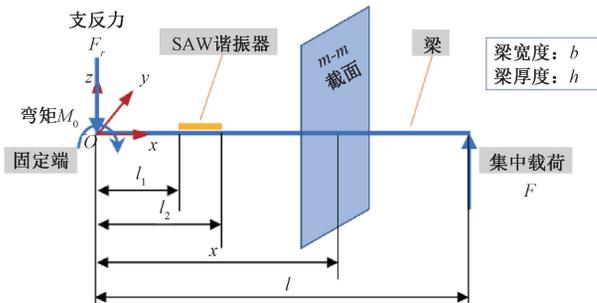


图 3 SAW 振动传感器左端梁力学模型示意图

Fig. 3 Mechanical model diagram of the left beam of SAW vibration sensor

取 X 轴上距离原点  $x$  位置处的任意截面  $m-m$ ,以其左侧受力来分析,由力学平衡方程得:

$$-M_0 + F_r \cdot x + M(x) = 0 \quad (1)$$

其中,  $M(x)$  为  $x$  点处所受弯矩,  $x$  为  $m-m$  截面距离原点距离,  $F_r$  为固定端所受支反力,  $M_0$  为固定端所受弯矩。

以整个左梁为研究对象,由力平衡条件得:

$$F_r = F \quad (2)$$

其中,  $F$  为所受集中载荷。

由式(1)、(2)可得:

$$M(x) = M_0 - F \cdot x \quad (3)$$

梁的挠曲线近似微分方程为:

$$z'' = \frac{M(x)}{EI} \quad (4)$$

其中,  $z$  为梁的挠度,  $E$  为材料弹性模量,  $I$  为梁的转动惯量。

边界条件为:

$$z \Big|_{x=0} = z' \Big|_{x=0} = 0 \quad (5)$$

$$z'' \Big|_{x=\frac{l}{2}} = 0 \quad (6)$$

利用式(3)~(6)求解得到:

$$M(x) = F \left( \frac{l}{2} - x \right) \quad (7)$$

则正应力  $\sigma$  为:

$$\sigma = \frac{M(x)}{W} = \frac{F \left( \frac{l}{2} - x \right)}{\frac{1}{6}bh^2} = \frac{3F(l-2x)}{bh^2} \quad (8)$$

其中,  $W$  为梁的抗弯截面系数,  $l$  为梁的长度,  $b$  为梁的宽度,  $h$  为梁的厚度。

则当  $0 \leq x \leq l$  时,梁所受纵向应变  $\varepsilon_x$ :

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma}{E} = \frac{3ma(l-2x)}{4Ebh^2} \quad (9)$$

因此,梁上 SAW 谐振器所受声表面波传播方向的平均应变  $\bar{\varepsilon}_x$ ,与垂直于声表面波传播方向的平均应变  $\bar{\varepsilon}_y$  分别可以表示为:

$$\bar{\varepsilon}_x = \frac{\int_{l_1}^{l_2} \frac{3ma(l-2x)}{4Ebh^2} dx}{l_2 - l_1} = \frac{3ma(l-l_1-l_2)}{4Ebh^2} \quad (10)$$

$$\bar{\varepsilon}_y = -\mu \frac{3ma(l-l_1-l_2)}{4Ebh^2} \quad (11)$$

其中,  $l_1$  为 SAW 谐振器距离原点最近距离,  $l_2$  为 SAW 谐振器距离原点最远距离,  $\mu$  为泊松比。

将平均应变值代入 SAW 谐振器的电学谐振频率变化  $\Delta f$  计算式(12)<sup>[22]</sup>,则具有单个 SAW 谐振器的振动传感器灵敏度  $S_0$  为:

$$\Delta f \approx f_0 [(r_1 - 1)\bar{\varepsilon}_x + r_2\bar{\varepsilon}_y] \quad (12)$$

$$S_0 = \frac{\Delta f}{a} = \frac{3f_0 m(l - l_1 - l_2)}{4Ebh^2}(r_1 - 1 - \mu r_2) \quad (13)$$

其中,  $f_0$  为 SAW 谐振器的基础电学谐振频率,  $r_1$  为纵向应变因子,  $r_2$  为横向应变因子。

本传感器的灵敏度  $S_{\text{sum}}$  与具有单个 SAW 谐振器的振动传感器灵敏度  $S_0$  以及 SAW 谐振器的位置布局与算法设计等有关。

## 2) 传感器固有频率

本文设计的 LGS SAW 高温振动传感器采用四端固支梁结构, 相对双端固支梁, 四端固支梁近似可看作刚度增加 1 倍, 而双端固支梁的刚度  $k_2$  由式 (14) 可得:

$$k_2 = \frac{4Ebh^3}{l_x^3} \quad (14)$$

其中,  $E$  为材料弹性模量,  $b$  为梁宽度,  $h$  为梁厚度,  $l_x$  为  $X$  轴向梁总长度。

故四端固支梁的刚度  $k_4$  可近似表达为:

$$k_4 \approx \frac{8Ebh^3}{l_x^3} \quad (15)$$

因此, 四端固支梁 LGS SAW 高温振动传感器的固有频率  $f_n$  由式 (16) 可得<sup>[23]</sup>:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_4}{m}} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{2Ebh^3}{ml_x^3}} \quad (16)$$

可见, 本传感器的固有频率与器件的结构类型、结构参数、材料参数及等效质量等密切相关。

## 2 传感器结构设计

### 2.1 设计目标

在保证高固有频率 ( $\geq 1\ 500$  Hz)、耐高温 ( $\geq 500^\circ\text{C}$ ) 基础上, 设计具有较高灵敏度的 SAW 振动传感器, 且满足器件尺寸小型化要求。

### 2.2 设计过程

SAW 振动传感器设计首先应根据设计目标制定器件设计方案, 具体包括选用合适的压电材料和结构方案, 本设计选用 LGS 材料, 采用四端固支梁结构, 并且在梁上对称布局共 8 个 SAW 谐振器。然后, 依次进行传感器各结构参数设计。根据传感器结构方案, 参数设计主要分为边框尺寸参数设计、SAW 谐振器位置及算法设计、SAW 谐振器参数设计、四端固支梁参数设计等部分。最后, 采用多物理场仿真软件 COMSOL Multiphysics 进行关键参数优化设计, 最终确定传感器所有参数。

#### 1) 边框尺寸参数设计

传感器边框尺寸参数首先取决于结构设计基本要求, 如器件制备工艺要求梁的宽度、相邻结构间隙、以及边框宽度至少为 2 mm, 因此, 外边框尺寸至少为 10 mm×10 mm。同时

在保证传感器固有频率高于 1 500 Hz 的基础上, 为了进一步优化器件灵敏度, 且兼顾小型化的设计要求, 故将传感器外边框设计为 20 mm×20 mm。此外, 商业常用 LGS 晶片厚度包括 0.3、0.5 和 1 mm 等, 为了实现传感器的高灵敏度, 本设计选用厚度为 0.3 mm 的 LGS 晶片。因此传感器外边框尺寸 ( $n_1 \times n_1 \times t_1$ ) 为 20 mm×20 mm×0.3 mm, 内边框尺寸 ( $n_2 \times n_2 \times t_1$ ) 为 16 mm×16 mm×0.3 mm。

#### 2) SAW 谐振器位置及算法设计

在 COMSOL 仿真软件中, 建立如图 2(a) 所示的 LGS SAW 振动传感器结构模型, 其中, LGS 的材料参数如表 1 所示, 适用于  $20^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$  的高温仿真<sup>[24-26]</sup>, 传感器边框施加固定约束, 整个器件施加沿  $Z$  轴负向的 1 g 加速度。如图 4(a) 所示为  $X$  轴向梁所受沿声表面波传播方向的应变 ( $XX$  应变) 与垂直于声表面波传播方向的应变 ( $YY$  应变)。可以看到,  $X$  轴向梁所受  $XX$  应变远大于  $YY$  应变, 因此, 可忽略  $YY$  应变, 仅考虑  $XX$  应变。同时,  $X$  轴向梁所受最大拉应变均靠近传感器固定端, 最大压应变均靠近中心质量块, 故将 SAW 谐振器依次设计在最大拉应变 ( $x_1, x_4$ ) 与最大压应变 ( $x_2, x_3$ ) 位置处。

表 1 LGS 晶体材料常数<sup>[24-26]</sup>

Table 1 Material constants of LGS crystal<sup>[24-26]</sup>

晶 体	材料常数 ( $T=20^\circ\text{C}$ )	温度系数	
		一阶 $/(\times 10^{-6}/^\circ\text{C})$	二阶 $/(\times 10^{-9}/^\circ\text{C}^2)$
$c_{11}$	18.89/ $(\times 10^{10}$ N/m <sup>2</sup> )	-65	-39
$c_{13}$	10.15/ $(\times 10^{10}$ N/m <sup>2</sup> )	-84	-86
$c_{14}$	1.442/ $(\times 10^{10}$ N/m <sup>2</sup> )	-304	88
$c_{33}$	26.83/ $(\times 10^{10}$ N/m <sup>2</sup> )	-105	-55
$c_{44}$	5.33/ $(\times 10^{10}$ N/m <sup>2</sup> )	-63	-80
$c_{66}$	4.237/ $(\times 10^{10}$ N/m <sup>2</sup> )	-29	-23
$e_{11}$	-0.437 1/(C/m <sup>2</sup> )	469.8	-428.5
$e_{14}$	0.103 9/(C/m <sup>2</sup> )	-713.8	1 594
$\varepsilon_{11}/\varepsilon_0$	19.05	134.5	118
$\varepsilon_{33}/\varepsilon_0$	51.81	-787.0	658.6
$\alpha_{11}$	—	5.20	6.7
$\alpha_{33}$	—	3.72	1.1
$\rho$	5 764/(kg/m <sup>3</sup> )	—	—

记  $X$  轴向梁  $x_1, x_2, x_3, x_4$  对应位置处的应变变化为  $\Delta\varepsilon_{x_i}$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ), 总应变变化为  $\Delta\varepsilon_x$ , 则结合结构对称性, 令:

$$\Delta\varepsilon_x = \Delta\varepsilon_{x_1} - \Delta\varepsilon_{x_2} - \Delta\varepsilon_{x_3} + \Delta\varepsilon_{x_4} \approx 4\Delta\varepsilon_{x_1} \quad (17)$$

由于 SAW 谐振器的电学谐振频率与所受应变成正比<sup>[22]</sup>, 即:

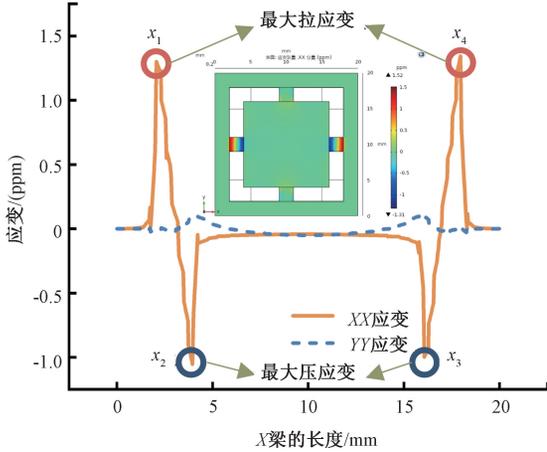
$$\Delta f \propto \Delta\varepsilon \quad (18)$$

记  $X$  轴向梁 SAW 谐振器的电学谐振频率变化为  $\Delta f_{x_i}$  ( $i=1,2,3,4$ ),  $X$  轴向电学谐振频率总变化为  $\Delta f_x$ , 则有:

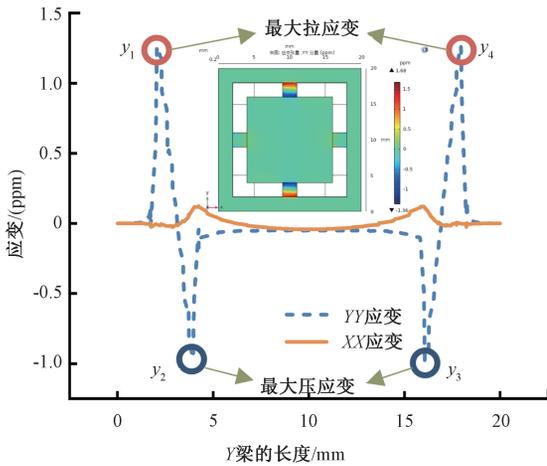
$$\Delta f_x = \Delta f_{x_1} - \Delta f_{x_2} - \Delta f_{x_3} + \Delta f_{x_4} \approx 4\Delta f_{x_1} \quad (19)$$

同理,  $Y$  轴向梁所受应变分析同  $X$  轴向梁, 故  $Y$  轴向梁 SAW 谐振器同样依次设计在最大拉应变 ( $y_1, y_4$ ) 与最大压应变 ( $y_2, y_3$ ) 位置处, 如图 4(b) 所示。则有:

$$\Delta f_y = \Delta f_{y_1} - \Delta f_{y_2} - \Delta f_{y_3} + \Delta f_{y_4} \approx 4\Delta f_{y_1} \quad (20)$$



(a)  $X$  轴向梁所受  $XX$  应变与  $YY$  应变  
(a)  $XX$  strain and  $YY$  strain of  $X$ -axis beam



(b)  $Y$  轴向梁所受  $XX$  应变与  $YY$  应变  
(b)  $XX$  strain and  $YY$  strain of  $Y$ -axis beam

图 4 梁所受应变

Fig. 4 Strain of beam

其中,  $\Delta f_{y_i}$  ( $i=1,2,3,4$ ) 为  $Y$  轴向梁 SAW 谐振器的电学谐振频率变化,  $\Delta f_y$  为  $Y$  轴向电学谐振频率总变化。由于传感器上所有 SAW 谐振器结构参数相同, 则有:

$$\Delta f_x = \Delta f_y \quad (21)$$

$$\Delta f_{\text{sum}} = \Delta f_x + \Delta f_y \approx 8\Delta f_{x_1} \quad (22)$$

其中,  $\Delta f_{\text{sum}}$  为传感器所有 SAW 谐振器总电学谐振频率变化。

则本传感器的灵敏度  $S_{\text{sum}}$  为:

$$S_{\text{sum}} = \frac{\Delta f_{\text{sum}}}{a} \approx \frac{8\Delta f_{x_1}}{a} = 8S_0 \quad (23)$$

因此, 将式(13)代入式(23), 本振动传感器的灵敏度可进一步简化为:

$$S_{\text{sum}} = \frac{6f_0 m(l - l_1 - l_2)}{Ebh^2}(r_1 - 1 - \mu r_2) \quad (24)$$

由此可知, 基于 8 个 SAW 谐振器对称布局与算法设计, 本传感器的灵敏度由 SAW 谐振器的基础电学谐振频率、传感器等效质量、梁的结构参数及材料参数等因素共同决定。相比单个谐振器结构, 本传感器在保证器件固有频率不变的前提下, 灵敏度提高约 8 倍。

### 3) SAW 谐振器参数设计

根据上述四端固支梁 LGS SAW 高温振动传感器设计, 需要在每根梁沿声表面波传播方向的最大拉应变与压应变位置处分别设计相同的 SAW 谐振器。由本传感器灵敏度式(24)可知, 较高的 SAW 基础电学谐振频率  $f_0$  有利于提高传感器的灵敏度, 其计算公式如式(25)、(26)所示。其中, 声表面波相速度  $v$  由晶片切向决定, 在晶片切向一定时, 叉指宽度  $w$  越窄, 波长  $\lambda$  越小, 从而 SAW 基础电学谐振频率  $f_0$  越大, 但同时工艺要求越高, 而且较窄的叉指高温下更易断裂。关于 SAW 谐振器的其他参数设计原则可参见文献[27]。

$$f_0 = \frac{v}{\lambda} \quad (25)$$

$$\lambda = 4w \quad (26)$$

其中,  $f_0$  为 SAW 基础电学谐振频率,  $v$  为声表面波相速度,  $\lambda$  为波长,  $w$  为叉指宽度。

结合梁尺寸和应变分布, 以及实际工艺限制, 本传感器设计的 SAW 谐振器参数如表 2 所示。其中, 叉指宽度为  $2 \mu\text{m}$ , 金属占空比为 1:1, 叉指对数为 40 对, 反射栅对数为 80 对, 叉指与反射栅的距离为  $5/4\lambda \mu\text{m}$ , 孔径为  $100\lambda \mu\text{m}$ , 为了能耐高温, 叉指电极采用金属 Cr/Pt, 厚度分别为 20 和 200 nm, 其中, Cr 作为粘附层, 能够增加 Pt 与基底 LGS 的粘附性。

表 2 SAW 谐振器参数

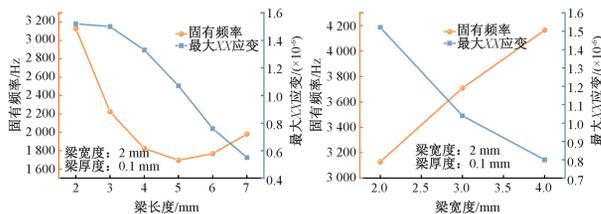
Table 2 Parameters of SAW resonator

参数	值
叉指宽度/ $\mu\text{m}$	2
金属占空比	1:1
叉指对数	40
反射栅对数	80
叉指与反射栅距离/ $\mu\text{m}$	$5/4\lambda$
孔径/ $\mu\text{m}$	$100\lambda$
电极厚度/nm	Cr 20/Pt 200

4) 四端固支梁参数优化设计

根据上述建立的 SAW 振动传感器数学模型可知,传感器的灵敏度、固有频率均与传感器的结构类型、结构参数、材料参数和等效质量等有关。为了实现 SAW 振动传感器性能最优,通过 COMSOL 软件对其关键结构参数进行仿真优化,从而得到最佳设计参数。由于 SAW 振动传感器的灵敏度与所受沿声表面波传播方向的应变成正比,因此,下述仿真采用该方向的最大应变代表传感器的灵敏度。

在 2.2 节 2) 中仿真模型的基础上,通过改变梁的长度、宽度、厚度等结构参数,得到传感器相应的力学性能,进而获得器件沿声表面波传播方向的最大应变与固有频率随结构参数的变化关系,如图 5(a)~(e)所示。其中,该传感器结构对称,外边框尺寸为 20 mm×20 mm×0.3 mm,内边框尺寸为 16 mm×16 mm×0.3 mm,中心质量块边长随梁长度而变化,厚度为 0.3 mm,梁长度分别为 2、3、4、5、6、7 mm,宽度分别为 2、3、4 mm,厚度分别为 0.1、0.2、0.3 mm。

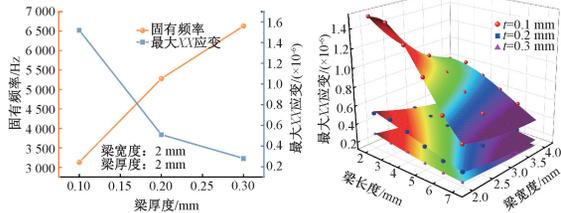


(a) 固有频率与最大 XX 应变随梁长度变化

(b) 固有频率与最大 XX 应变随梁宽度变化

(a) Natural frequency and the maximum XX strain with different beam lengths

(b) Natural frequency and the maximum XX strain with different beam widths

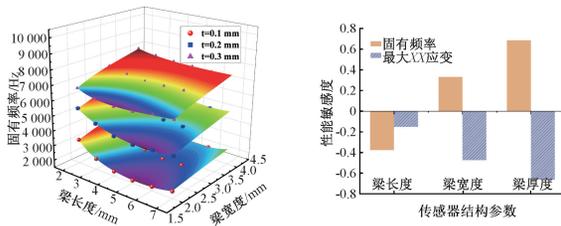


(c) 固有频率与最大 XX 应变随梁厚度变化

(d) 最大 XX 应变随梁结构参数变化

(c) Natural frequency and the maximum XX strain with different beam thicknesses

(d) The maximum XX strain with different structural parameters



(e) 固有频率随梁结构参数变化

(f) 传感器性能对结构参数变化敏感度

(e) Natural frequency with different structural parameters

(f) Sensor performance sensitivity to structural parameters

图 5 传感器性能随结构参数变化仿真结果

Fig. 5 Simulation results of sensor performance with different structural parameters

从图 5(a)~(e) 可以看到,传感器的最大 XX 应变和固有频率与器件的结构参数密切相关。其中,最大 XX 应变,随梁长度、宽度、厚度的增大,均逐渐减小;固有频率则随梁长度增大而先减小后增大,随梁宽度、厚度增大而增大。同时,各结构参数变化对传感器性能参数影响也不同,以各结构参数平均相对变化为 1 时,引起的传感器性能相对变化率来表示传感器性能对结构参数变化的敏感度。如图 5(f) 所示,对于最大 XX 应变,梁厚度影响最大,宽度次之,长度最小;对于固有频率,梁厚度影响最大,长度次之,宽度最小。

为了设计具有较大固有频率的高灵敏度 LGS SAW 高温振动传感器,结合上述仿真结果,最终确定传感器最佳结构参数为梁长度 2 mm,宽度 2 mm,厚度 0.1 mm,对应的最大 XX 应变为  $1.52 \times 10^{-6}$ ,固有频率为 3 123.4 Hz。表 3 所示为本文设计的 LGS SAW 高温振动传感器所有结构参数。

总之,声表面波振动传感器的设计,通常需要根据设计目标,合理的设计方案;然后按照设计原则,依次进行各类结构参数设计;同时在设计过程中,可以依据数学模型确定关键参数,借助仿真软件进行器件参数优化仿真,从而确定最佳设计参数,实现传感器的最优性能。

表 3 SAW 振动传感器结构参数

Table 3 Structural parameters of SAW vibration sensor

参数	值/mm
外边框外边长 ( $n_1$ )	20
内边框内边长 ( $n_2$ )	16
边框厚度 ( $t_1$ )	0.3
梁长度 ( $l$ )	2
梁宽度 ( $b$ )	2
梁厚度 ( $t_2$ )	0.1
质量块边长 ( $n_3$ )	12
质量块厚度 ( $t_3$ )	0.3

3 仿真分析及验证

基于上述设计参数,针对提出的四端固支梁 LGS SAW 高温振动传感器,分别在常温与高温下进行电学谐振频率仿真、力学仿真、模态仿真及谐响应仿真,并进行了相关分析,从而得到传感器相应的性能参数及其变化规律,进一步探索了 SAW 振动传感器的高温传感机制,为解决高温振动环境下的测试难题提供了参考。

3.1 常温仿真

1) 电学谐振频率仿真

根据上述 SAW 谐振器设计参数,基于一对叉指结构,通过设置力学与电学周期性边界条件,建立 SAW 谐

振器的电学仿真模型,进行仿真。其中,沿 X 轴向的 SAW 谐振器,切向为(0°, 138.5°, 26.7°),其 S11 参数随谐振频率的变化如图 6 所示。SAW 谐振器的反对称谐振频率  $f_{s-}$  为 297.62 MHz,对称谐振频率  $f_{s+}$  为 304.24 MHz,利用式(27)可得,传感器的基础电学谐振频率  $f_0$  为 300.93 MHz。此外,在对称与反对称模式下,声表面波能量均集中在表面 1~2 个波长之内,且随着深度增加,能量迅速衰减。

$$f_0 = (f_{s+} + f_{s-}) / 2 \quad (27)$$

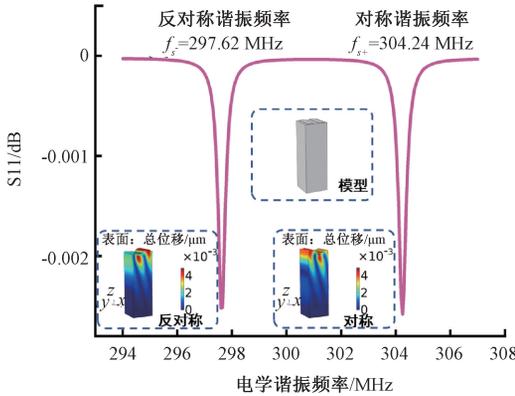


图 6 SAW 振动传感器的 S11 参数

Fig. 6 S11 parameter of SAW vibration sensor

2) 力学仿真

根据上述结构优化参数,建立 SAW 振动传感器的力学仿真模型,沿 Z 轴向向依次施加 1~10 g 的加速度,如图 7(a)和(b)所示分别为 X 轴向梁上 XX 应变与 Y 轴向梁上 YY 应变分布。随着加速度增加,X 梁上  $x_1, x_2, x_3, x_4$  点与 Y 梁上  $y_1, y_2, y_3, y_4$  点位置的应变均逐渐增大,分别提取相应的应变,利用前述算法得到不同加速度下的总应变值,如图 7(c)所示。本传感器总应变值随加速度增加而逐渐增大,得到线性拟合关系如式(28)所示,相关系数  $R^2 = 1$ ,故传感器灵敏度为  $9.20194 \times 10^{-6}/g$ ,而具有单个 SAW 谐振器的传感器灵敏度仅为  $1.30572 \times 10^{-6}/g$ ,本传感器相较其提高约 7.047 倍。同时,相比其他多梁 SAW 谐振器结构的器件灵敏度( $\approx 0.4629 \times 10^{-6}/g$ )<sup>[28]</sup>,本传感器提高约 19.88 倍。因此,本设计显著提高了传感器灵敏度。

$$y = 9.20194 \cdot x + 6.00001e^{-9} \quad (28)$$

3) 模态仿真

模态分析能够反映 SAW 振动传感器的振动响应特性,从而得到传感器的固有频率与模态振型,便于确定传感器工作带宽。如图 8 所示为 20℃ 四端固支梁 LGS SAW 振动传感器的前六阶模态振型图。一阶至六阶振型固有频率分别为 3 123.4、4 314.2、4 500.9、6 563.7、12 082、13 346 Hz。其中,一阶模态振型沿 Z 轴上下进行

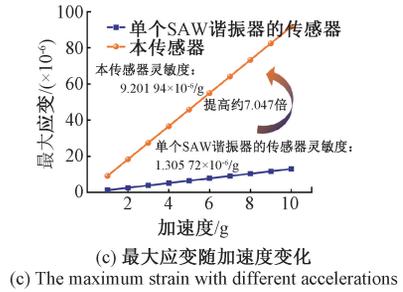
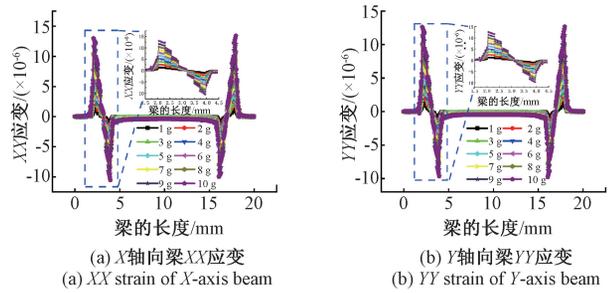


图 7 不同加速度下的梁应变

Fig. 7 Strain of beam at different accelerations

振动,二阶模态绕 Y 轴进行转动,三阶模态绕 X 轴进行转动,四阶、五阶、六阶模态振型均沿不同方向扭曲。一阶振型固有频率 3 123.4 Hz 与其他阶振型频率偏离较远,表明其抗干扰能力强,稳定性好。传感器工作频段约为 0~1 500 Hz,相较悬臂梁式 SAW 振动传感器,本传感器具有较大带宽。此外,二阶与三阶模态都是绕 XOY 平面内的轴进行转动,故振型频率相差较小。

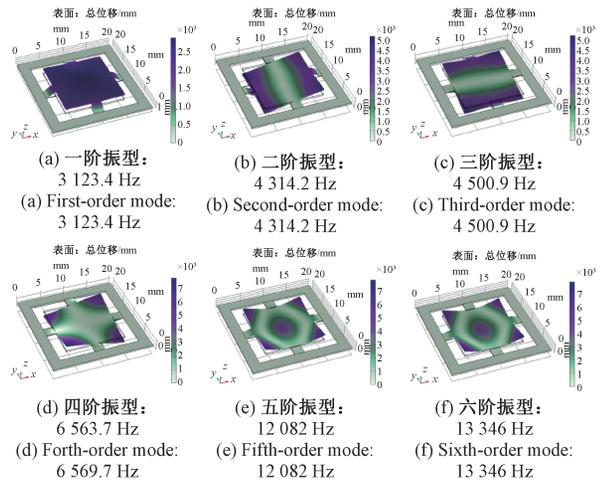


图 8 20℃ 传感器各阶模态振型

Fig. 8 Each modal shape of sensor at 20℃

4) 谐响应仿真

谐响应分析通常是指结构受到周期载荷作用下的响应,用于预判器件的连续动态特性,从而避免结构共振引起的器件损伤<sup>[29]</sup>。通过对 SAW 振动传感器沿 Z 轴向

施加 1 g 加速度,并添加 0~4 200 Hz 扫频,进行常温谐响应分析。如图 9 所示为 20℃ 时传感器频响曲线,可以看到一阶谐振峰出现在 3 123.4 Hz,即传感器的一阶固有频率为 3 123.4 Hz,与模态分析一致。同时,在工作频段 0~1 500 Hz 范围内,最大应力变化平缓,属于线性区域,进一步验证带宽的可行性。

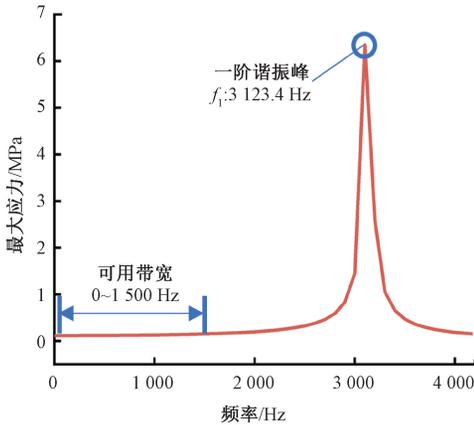


图 9 20℃ 传感器频响曲线

Fig. 9 Frequency response curve of sensor at 20℃

### 3.2 高温仿真

为了进一步探究四端固支梁 LGS SAW 振动传感器的高温传感规律,针对本传感器进行了高温性能仿真分析。由于 LGS 属于各项异性压电晶体,温度不仅影响其热膨胀系数,而且对其弹性模量、压电常数、介电常数等材料参数也会产生影响<sup>[19]</sup>。相比其他参数,热膨胀系数变化对传感器性能影响较小,故在高温仿真中,忽略了热膨胀系数随温度变化的影响。

#### 1) 电学谐振频率仿真

在常温模型的基础上,加入温度场,仿真了 20℃~800℃ 下 SAW 振动传感器沿 X 轴向(0°, 138.5°, 26.7°)谐振器的电学谐振频率,如图 10 所示为其随温度变化曲线。随着温度升高,SAW 振动传感器电学谐振频率在 20℃~200℃ 逐渐增大,在 200℃~800℃ 逐渐减小,且温度越高,电学谐振频率变化越大。仿真结果与文献[21]报道中(0°, 138.5°, 26.7°)实测温度曲线在 20℃~700℃ 单调减小略有不同,这可能由于本研究中忽略了热膨胀系数随温度变化影响而引起 SAW 振动传感器温度拐点发生偏移。本传感器温度曲线拟合公式如式(29)所示,相关系数  $R^2 = 0.999 99$ 。同时,在 20℃ 与 800℃ 下,SAW 谐振器的反对称谐振模型与对称谐振模型,振型基本一致,表明高温对声表面波谐振振型影响较小。

$$y = 300.863 58 + 0.003 3 \cdot x - 1.169 23e^{-5} \cdot x^2 \quad (29)$$

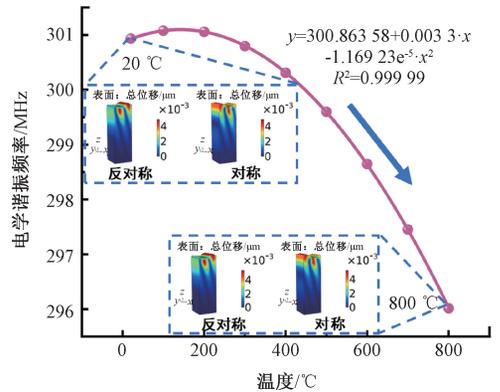


图 10 X 轴(0°, 138.5°, 26.7°)SAW 谐振器温度响应曲线

Fig. 10 Temperature response curve of SAW resonator along X-axis (0°, 138.5°, 26.7°)

#### 2) 力学仿真

基于四端固支梁 LGS SAW 振动传感器常温力学模型,添加 20℃~800℃ 温度场,进行高温力学仿真。利用前述算法,分别提取不同温度下 1~10 g 对应的总应变,得到应变随加速度变化关系。如图 11 所示,在 20℃~800℃ 范围内,应变均随加速度增大而线性增大,20℃ 传感器灵敏度为  $9.201 94 \times 10^{-6}/g$ ,随着温度升高,灵敏度增大,800℃ 时达到  $9.879 1 \times 10^{-6}/g$ 。根据传感器灵敏度式(24)可知,灵敏度与材料弹性模量有关,LGS 弹性模量随温度升高而逐渐减小,从而导致传感器灵敏度增大<sup>[30]</sup>。20℃~800℃ 范围内,LGS SAW 振动传感器的灵敏度变化关系如式(30)所示,相关系数  $R^2 = 0.999 69$ ,利用该公式,由当前温度可得相应传感器灵敏度。

$$y = 9.198 24 + 3.063 68e^{-4} \cdot x + 6.754 51e^{-7} \cdot x^2 \quad (30)$$

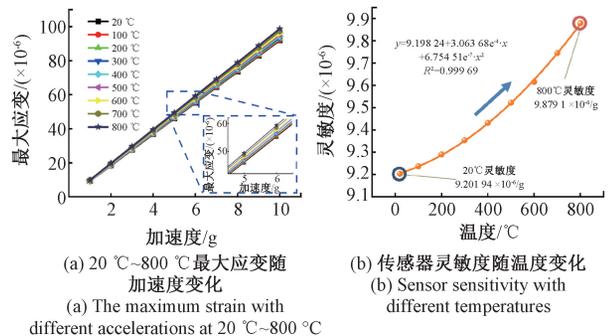


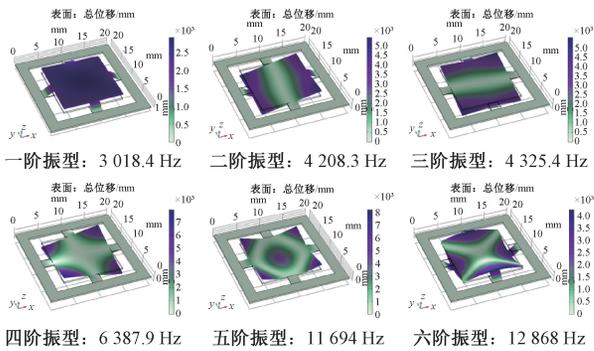
图 11 不同温度下传感器加速度响应及灵敏度

Fig. 11 Acceleration response and sensitivity of sensor at different temperatures

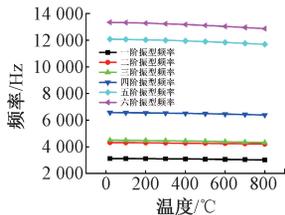
#### 3) 模态仿真

传感器高温结构模态特性对于评定其工作带宽具有重要意义。在传感器常温模态仿真基础上,添加 20℃~800℃ 温度场,仿真得到不同温度器件模态特性。如

图 12(a)所示为 800℃ 传感器前六阶模态振型,对应各阶固有频率依次为 3 018.4、4 208.3、4 325.4、6 387.9、11 694、12 868 Hz。进一步提取不同温度下传感器各阶振动模态频率,如图 12(b)所示,随着温度升高,一阶至六阶振型频率都逐渐下降,在 20℃~800℃ 范围内,相对变化率依次为 -3.36%、-2.45%、-3.90%、-2.68%、-3.21%、-3.58%,最大相对变化率出现在三阶振型频率,仅为 -3.90%,对传感器的高温工作带宽影响较小。此外,通过不同温度各阶模态振型图可知,传感器各阶模态振型在 20℃~800℃ 范围内基本一致,可见高温使传感器固有频率降低,而对其振型影响较弱。



(a) 800℃ 传感器各阶模态振型  
(a) Each modal shape of sensor at 800℃



(b) 传感器各阶振型频率随温度变化  
(b) Each modal frequency of sensor with different temperatures

图 12 高温模态仿真

Fig. 12 Modal simulation at high temperature

4) 谐响应仿真

为了进一步分析高温下传感器的频响特性,基于常温谐响应分析,仿真了高温下最大应力随频率变化关系,得到不同温度下传感器频响曲线,如图 13 所示。在 20℃~800℃ 范围内,随着温度升高,传感器的一阶谐振峰从 3 123.4 Hz 逐渐减小到 3 018.4 Hz,与高温模态仿真结果一致。一阶固有频率随温度变化关系如式(31)所示,相关系数  $R^2=1$ ,可以根据当前温度得到对应传感器固有频率。同时,由高温频响曲线可知,传感器工作带宽 0~1 500 Hz 在 20℃~800℃ 范围内始终满足要求。此外,结合传感器固有频率式(16)可知,固有频率受器件结构等效刚度与等效质量共同影响,随着温度增加,传感器等效刚度减小,从而引起器件固有频率减小,仿真结果与理论模型分析一致。

$$y = 3\ 124.418\ 39 - 0.052\ 11 \cdot x - 1.003\ 89e^{-4} \cdot x^2 \quad (31)$$

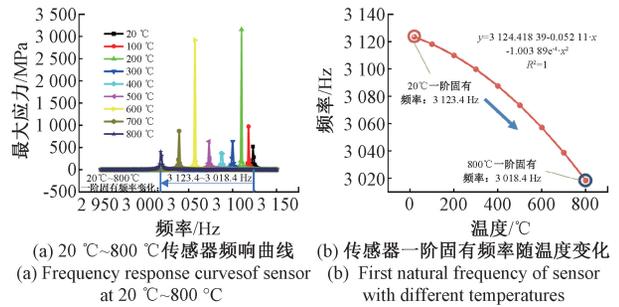
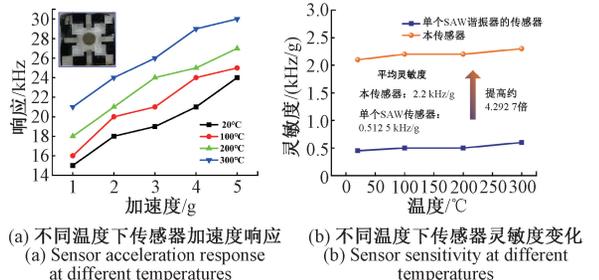


图 13 传感器高温谐响应分析  
Fig. 13 Harmonic response analysis of sensor at high temperature

3.3 实验验证

为了初步验证本文提出的四端固支梁 SAW 多谐振器高温振动传感器设计方案,制备了 10 mm×10 mm 的 LGS SAW 四谐振器振动传感器,如图 14(a)中插图所示, X 轴向为(0°, 138.5°, 26.7°), SAW 谐振器对称布局,且均位于梁的最大应变处,根据前述算法设计,以所有谐振器响应之和作为传感器总响应。将传感器在 20℃~300℃ 下进行 1~5 g 振动实验,得到不同温度下的加速度总响应如图 14(a)所示,随着加速度增加,传感器响应应逐渐增大,通过线性拟合,得到传感器灵敏度随温度变化曲线如图 14(b)所示,在 20℃~300℃ 内,本传感器平均灵敏度为 2.2 kHz/g,而具有单个 SAW 谐振器的传感器平均灵敏度为 0.512 5 kHz/g,相比其提高约 4.292 7 倍。实验结果与上述器件性能仿真结果趋势基本一致,证明了本设计方法的有效性,即通过结构优化与算法设计,能够提高传感器灵敏度。同时,传感器的温度响应如图 14(c)所示,随着温度升高,传感器的电学谐振频率逐渐减小,温度响应拟合曲线如图 14(d)所示,与仿真结果趋势基本一致,拟合关系式如式(32)所示,相关系数  $R^2=0.990\ 87$ 。综上,本实验结果初步验证了本文提出的 SAW 高温振动传感器设计方案的可行性。

$$y = 169.457\ 26 + 7.608\ 98e^{-4} \cdot x - 6.498\ 15e^{-6} \cdot x^2 \quad (32)$$



(a) 不同温度下传感器加速度响应  
(a) Sensor acceleration response at different temperatures  
(b) 不同温度下传感器灵敏度变化  
(b) Sensor sensitivity at different temperatures

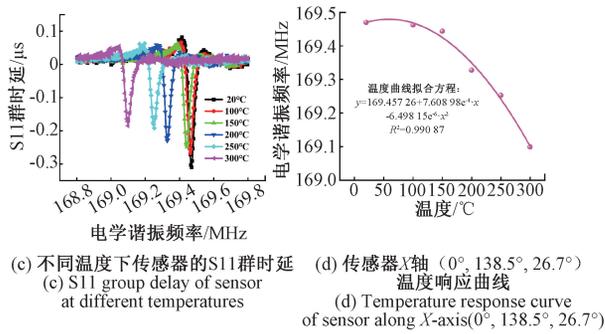


图14 10 mm×10 mm LGS SAW 四谐振器高温振动传感器测试结果

Fig. 14 Test results of LGS SAW high-temperature vibration sensor with four resonators and a size of 10 mm×10 mm

## 4 结 论

针对 SAW 振动传感器现存的工作频段窄、难以实现 500℃ 以上高温振动测量等问题,本文提出一种基于四端固支梁对称结构的高灵敏度、宽频段 LGS SAW 高温振动传感器,最高可耐温 800℃,并开展了相关研究,结论如下:

1) 采用 8 个相同 SAW 谐振器对称布局,结合算法优化设计,同步实现传感器的高灵敏度与宽频段;相比单一 SAW 谐振器结构,本传感器灵敏度提高约 7.047 倍,传感器带宽为 0~1 500 Hz。

2) 构建了传感器数学模型,分析可得传感器的灵敏度和固有频率均与其结构类型、结构参数、材料参数、等效质量等有关,此外,灵敏度还与 SAW 谐振器参数相关,因此,传感器最佳结构参数需要协同优化设计。

3) 基于优化模型,仿真了传感器在 20℃~800℃ 范围内的各项性能指标,揭示了 LGS SAW 振动传感器的高温力学与电学性能规律,在 20℃ 时传感器灵敏度为  $9.20194 \times 10^{-6}/g$ ,随着温度升高,灵敏度逐渐增大,800℃ 为  $9.8791 \times 10^{-6}/g$ ,这与 LGS 弹性模量随温度升高而降低有关。此外,传感器的一阶固有频率在 20℃ 为 3 123.4 Hz,随着温度增加固有频率减小,800℃ 为 3 018.4 Hz,这是由于温度升高引起传感器刚度减小而导致。仿真结果与理论模型分析一致,相互作用证了模型的准确性。

4) 通过 10 mm×10 mm 的四端固支梁 LGS SAW 四谐振器振动传感器的高温振动实验,初步验证了本设计方法的可行性。

本研究为 SAW 振动传感器优化设计提供了新的思路和理论依据,并为其在高温振动监测应用奠定了基础。

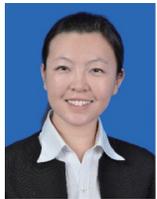
## 参考文献

- [1] HUNTER G W, WRBANEK J D, OKOJIE R S, et al. Development and application of high-temperature sensors and electronics for propulsion applications [C]. Sensors for Propulsion Measurement Applications 2006. DOI: 10.1117/12.668458.
- [2] 苏静雷,王红军,王政博,等.多通道卷积神经网络和迁移学习的燃气轮机转子故障诊断方法[J].电子测量与仪器学报,2023,37(3):132-140.  
SU J L, WANG H J, WANG ZH B, et al. Fault diagnosis method of gas turbine rotor with multi-channel convolutional neural network and transfer learning [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(3):132-140.
- [3] HASHEMIAN H M. On-line monitoring applications in nuclear power plants [J]. Progress in Nuclear Energy, 2011, 53(2): 167-181.
- [4] 李世维,王群书,古仁红,等.高g值微机械加速度传感器的现状与发展[J].仪器仪表学报,2008,29(4): 892-896.  
LI SH W, WANG Q SH, GU R H, et al. Situation and trend of high-g micromachined accelerometer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(4): 892-896.
- [5] JIANG X, KIM K, ZHANG S, et al. High-temperature piezoelectric sensing [J]. Sensors (Switzerland), 2014, 14(1): 144-169.
- [6] 乔诗翔,李豪杰,于航,等.高低温环境对三轴高g值加速度传感器灵敏度变化影响研究[J].仪器仪表学报,2023,44(5): 240-248.  
QIAO SH X, LI H J, YU H, et al. Research on the influence of high and low temperature environment on the sensitivity change of three-axis high-g accelerometer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(5): 240-248.
- [7] UTZ A, WALK C, STANITZKI A, et al. A high-precision and high-bandwidth MEMS-based capacitive accelerometer [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(16): 6533-6539.
- [8] LI S, YU B, WU X, et al. Low-cost fiber optic extrinsic Fabry-Perot interferometer based on a polyethylene diaphragm for vibration detection [J]. Optics

- Communications, 2020, 457: 124332.
- [9] ZHANG S, YU F. Piezoelectric materials for high temperature sensors[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2011, 94(10): 3153-3170.
- [10] 陈毅强, 王玉田, 李泓锦, 等. 压电加速度计本底噪声研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(4): 951-960.  
CHEN Y Q, WANG Y T, LI H J, et al. Study on the noise floor of piezoelectric accelerometer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(4): 951-960.
- [11] TADIGADAPA S, MATETI K. Piezoelectric MEMS sensors: State-of-the-art and perspectives[J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(9): 92001.
- [12] MOULZOLF S C, BEHANAN R, LAD R J, et al. Langasite SAW pressure sensor for harsh environments[C]. IEEE International Ultrasonics Symposium, IUS, 2012: 1224-1227.
- [13] SHU L, PENG B, YANG Z, et al. High-temperature SAW wireless strain sensor with langasite[J]. Sensors, 2015, 15(11): 28531-28542.
- [14] MASKAY A, DA CUNHA M P. High-temperature microwave acoustic vibration sensor[C]. 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), IEEE, 2018: 1-3.
- [15] MERKULOV A A, ZHGOON S A, SHVETSOV A S, et al. Properties of SAW vibration sensors applicable in the field of power engineering[C]. 2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), IEEE, 2021: 1-5.
- [16] FILIPIAK J, SOLARZ L, STECZKO G. Surface acoustic wave (SAW) vibration sensors[J]. Sensors, 2011, 11(12): 11809-11832.
- [17] WANG W, HUANG Y, LIU X, et al. Surface acoustic wave acceleration sensor with high sensitivity incorporating ST-X quartz cantilever beam[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 24(1): 15015.
- [18] BOWER D, CRACKNELL M, HARRISON A. A high linearity SAW accelerometer[C]. 41st Annual Symposium on Frequency Control, IEEE, 1987: 544-547.
- [19] NAGMANI A K, BEHERA B. A review on high temperature piezoelectric crystal  $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$  for sensor applications[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2022, 69(3): 918-931.
- [20] WILSON W, ATKINSON G. Characterization of langasite SAW devices to determine the temperature and strain coefficients of velocity[J]. Sensors and Transducers, 2014, 162(1): 21-28.
- [21] BARDONG J, AUBERT T, NAUMENKO N, et al. Experimental and theoretical investigations of some useful langasite cuts for high-temperature SAW applications[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2013, 60(4): 814-823.
- [22] WANG W, XUE X, HUANG Y, et al. A novel wireless and temperature-compensated SAW vibration sensor[J]. Sensors (Switzerland), 2014, 14(11): 20702-20712.
- [23] 马颖蕾. 八梁固支压阻加速度传感器及测试电路[D]. 上海: 复旦大学, 2010.  
MA Y L. A 8-end fixed beam piezoresistive accelerometer and test circuit[D]. Shanghai: Fudan University, 2010.
- [24] NICOLAY P, AUBERT T. A numerical method to derive accurate temperature coefficients of material constants from high-temperature SAW measurements: application to langasite[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2013, 60(10): 2137-2141.
- [25] BUNGO A, JIAN C, YAMAGUCHI K, et al. Experimental and theoretical analysis of SAW properties of the langasite substrate with Euler angle ( $0^\circ$ ,  $140^\circ$ ,  $\varphi$ ) [C]. 1999 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings, International Symposium, IEEE, 1999: 231-234.
- [26] KRÄUSSLICH J, HÖFER S, ZASTRAU U, et al. Temperature dependence of lattice parameters of langasite single crystals[J]. Crystal Research and Technology, 2010, 45(5): 490-492.
- [27] YE X, FANG L, LIANG B, et al. Studies of a high-sensitive surface acoustic wave sensor for passive wireless blood pressure measurement[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2011, 169(1): 74-82.
- [28] 郭欣榕, 张永威, 谭秋林, 等. 新型声表面波三轴加速度传感器的设计仿真[J]. 压电与声光, 2020, 42(5): 644-648.  
GUO X R, ZHANG Y W, TAN Q L, et al. Design and simulation of a novel SAW triaxial acceleration sensor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2020, 42(5): 644-648.

- [29] 张国军, 陈尚, 薛晨阳, 等. 一种新型的压阻式硅微二维加速度计的设计[J]. 仪器仪表学报, 2009(9): 1940-1945.
- ZHANG G J, CHEN SH, XUE CH Y, et al. The design of a novel piezoresistive two-axis accelerometer based on silicon [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009(9): 1940-1945.
- [30] NAKAMURA N, SAKAMOTO M, OGI H, et al. Elastic constants of langasite and alpha quartz at high temperatures measured by antenna transmission acoustic resonance [J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(7): 73901.

### 作者简介



张娟, 2012 年于南京农业大学获得学士学位, 2014 年于西安交通大学获得硕士学位, 现为中北大学博士研究生, 主要研究方向为无线无源声表面波传感器。

E-mail: zhangjuan@tit.edu.cn

**Zhang Juan** received her B. Sc. degree in 2012 from Nanjing Agricultural University, received her M. Sc. degree in 2014 from Xi'an Jiaotong University. She is currently a Ph. D. candidate at North University of China. Her main research interest is wireless passive surface acoustic wave sensors.



谭秋林(通信作者), 分别于 2002 年、2006 年、2009 年于中北大学获得学士、硕士、博士学位, 现为中北大学教授, 主要研究方向为恶劣环境下的微传感器与集成系统。

E-mail: tanqiulin@nuc.edu.cn

**Tan Qiulin** (Corresponding author) received his B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree all from North University of China in 2002, 2006, and 2009, respectively. He is currently a professor at North University of China. His main research interest is microsensors and integrated systems for harsh environments.